

Kompakter Nullpunkt-Winkelsensor auf Basis eines Kösters-Prismas

Vinzenz Ullmann, Eberhard Manske

Institut für Prozessmess- und Sensortechnik, Technische Universität Ilmenau

<mailto:vinzenz.ullmann@tu-ilmenau.de>

Zur Erfassung kleinster Winkeländerungen wurde ein Weißlichtinterferometer mit einem Kösters-Prisma aufgebaut. Das Kippen des für Mess- und Referenzstrahl gemeinsam genutzten Spiegels erzeugt ein Umklappen der Interferenzstreifen im aufgenommenen Kamerabild. Diese Neigungswinkeländerung der Streifen wird zur Auswertung des Spiegelwinkels genutzt.

1 Motivation

Die Laser- und Weißlichtinterferometrie kommt in der Mikro- und Nanomesstechnik zumeist bei der Erfassung von Topologien, Längen- oder Höhenmaßen zur Anwendung [1]. Zur Reduzierung der Messunsicherheiten müssen jedoch auch kleinste Winkelabweichungen erfasst werden, die bei einer Messung als systematischer Fehler (Abbe-Fehler) in das Messergebnis eingehen [2]. In der Praxis wird für die Erfassung oder Ausregelung der Winkellagen von bewegten Objekten zumeist das Autokollimationsprinzip verwendet [3], da es kontaktlos arbeitet. Am Institut für Prozessmess- und Sensortechnik (IPMS) der TU Ilmenau wurde nun ein kompaktes Weißlichtinterferometer zur Erfassung kleinster Winkel auf Basis eines Kösters-Prismas aufgebaut [4] und charakterisiert.

2 Messprinzip

Das aufgebaute Interferometer (Abb. 1) besteht aus einem zentralen Kösters-Prisma mit einer Kantenlänge von 18x18mm. In einem Abstand von 10mm befindet sich der von Mess- und Referenzarm gemeinsam genutzte Spiegel. Eine Verkipfung des Spiegels führt zu einer Änderung der Streifenbreite. Unter ganz bestimmten Bedingungen bedeutet eine Zunahme der Streifenbreite auch eine Neigung eben dieser (Abb. 3). Diese zunehmende Neigung führt letztendlich zu einem kompletten Umklappen der Streifen. Der Anstieg der Streifenwinkeländerung ist im Umkehrpunkt am Größten. Als Lichtquelle kommt eine divergente Weißlichtquelle zum Einsatz. Diese besteht im Laborexperiment aus einer LED und einem gekoppelten Multimode-Lichtwellenleiter. Die LED besitzt eine mittlere Wellenlänge von $\lambda_c = 541,4\text{nm}$ und eine spektrale Halbwertsbreite von 100,1nm. Der Lichtwellenleiter besitzt einen Kerndurchmesser von $50\mu\text{m}$ und eine numerische Apertur mit $NA=0,22$. Der Spiegelneigungswinkel φ führt zu einem Versatz der reflektierten Teilstrahlen (rot, blau) von $\Delta 2s$. Damit sich infolge einer Winkeländerung am Spiegel eine Neigung der Interferenzstreifen ψ ergibt, muss das Kösters-Prisma einen Schielwinkelfehler in orthogonaler Komponente zur

Spiegelneigungsrichtung aufweisen, wobei dieser Fehlwinkel (ca. $30''$) in einem festen Versatz beider Teilstrahlen von Δe auf der CMOS-Matrix resultiert.

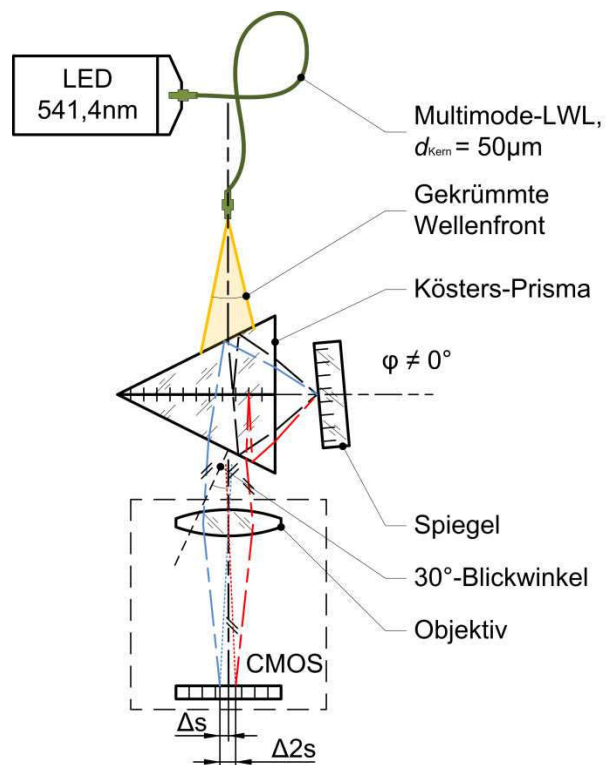


Abb. 1 Messaufbau zur Erfassung kleinster Winkelabweichungen mit divergentem Weißlicht aus einem Multimode-LWL.

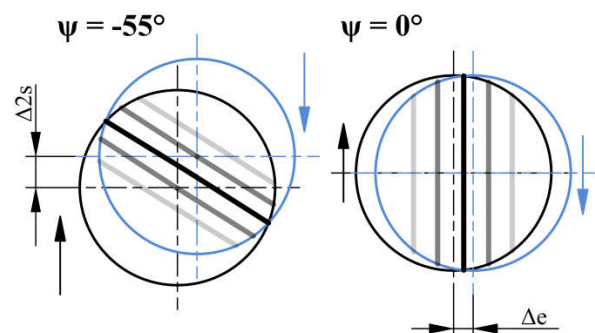


Abb. 2 Prinzip der Streifenbildung bei Verwendung einer kurzkohärenten Lichtquelle.

Bei Verkippung des Spiegels wandern nun beide Teilstrahlen versetzt aneinander vorbei (Abb. 2). Interferenz entsteht nur dort, wo die zeitliche und räumliche Kohärenzbedingung eingehalten wird.

3 Versuchsdurchführung

Das Interferometer wurde so aufgebaut, dass sich der Spiegelabstand variieren lässt (Abb. 4) und verschiedene baugleiche Kösters-Prismen eingesetzt werden können. Abb. 3 zeigt eine Bildfolge bei Neigung des Spiegels.

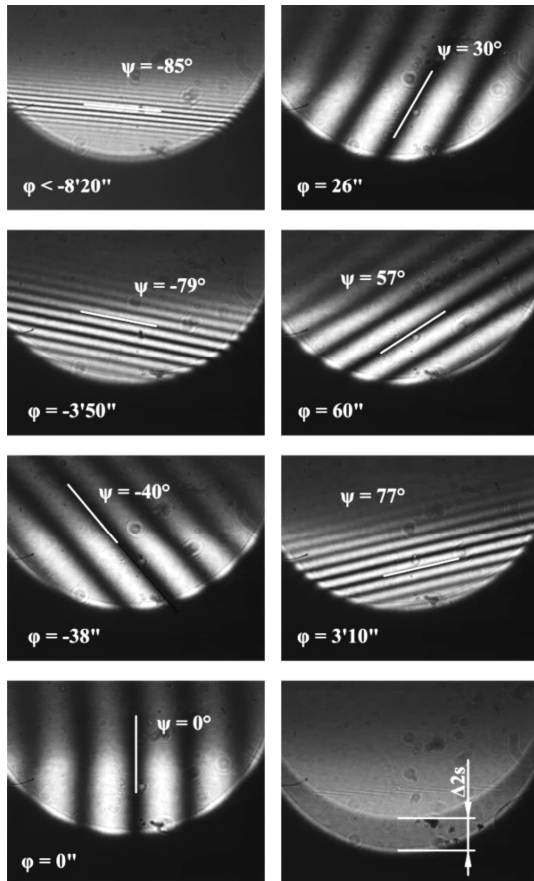


Abb. 3 Abfolge von Interferenzbildern bei unterschiedlichen Neigungswinkeln φ des Spiegels.

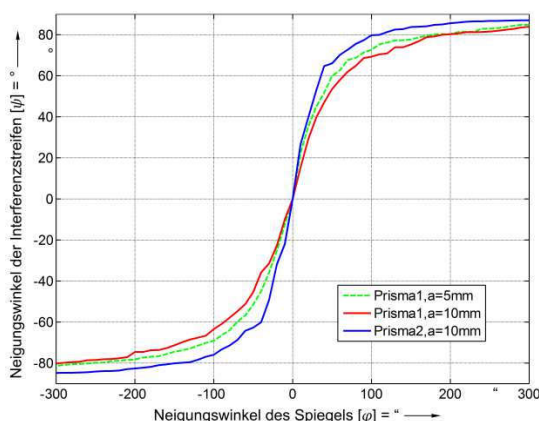


Abb. 4 Winkelneigung für Kösters-Prisma 1 bei zwei unterschiedlichen Spiegelabständen und für Prisma 2.

Die verschiedenen Kösters-Prismen besitzen fertigungsbedingt unterschiedliche Schiefefehler, die in unterschiedlichen Kennlinienanstiegen münden.

4 Theoretische Winkelauflösung

Der Zusammenhang zwischen Streifenneigungswinkel $[\psi]=^\circ$ und Spiegelkippwinkel $[\varphi]=''$ wird über die zugeschnittene Größengleichung (1) beschrieben, wobei b die Winkelempfindlichkeit beschreibt, die von den Randparametern der Optik (f), dem Schiefefehler ($\Delta\epsilon$) und dem Spiegelabstand a abhängt. Der Faktor b muss kalibriert werden.

$$\psi = \tan^{-1}(b \cdot \varphi) \quad (1)$$

Eine theoretische, maximale Winkelauflösung im Umkehrpunkt lässt sich für das gezeigte Beispiel (Abb. 4) über den dortigen linearen Verlauf ableiten. Hier entspricht ein $\Delta\psi=1^\circ$ einem $\Delta\varphi=0,63''$. Die Detektion des Winkelanstiegs eines Interferenzstreifens ergibt sich aus 1280 Pixeln in einer Zeile der CMOS-Matrix. Daraus ergibt sich ohne Subpixelauswertung ein kleinster detektierbarer Neigungswinkel von einem Pixel auf 1280 Pixeln: $1/1280$, $\Delta\psi_{\min}=0,045^\circ$. Die kleinste theoretisch detektierbare Spiegelneigungsänderung beträgt dann $\Delta\varphi_{\min}=\Delta\psi_{\min}(\Delta\varphi/\Delta\psi)=0,028''=0,14\mu\text{rad}$.

5 Zusammenfassung und Ausblick

Das Interferometer zur Winkelmessung durch Auswertung der Neigung eines Interferenzstreifenbildes wurde im Experiment realisiert und charakterisiert. Im nächsten Schritt muss eine automatisierte Auswertung der Streifenneigung geschaffen werden, um ein komplettes Messsystem aufzubauen. Aufgrund der möglichen, sehr kompakten Bauweise, ist eine Verwendung als absoluter Winkel-Nullpunkt-Indikator bei der Initialisierung von Koordinatensystemen in Koordinaten- und Nanomessmaschinen denkbar.

Literatur

- [1] E. Manske, G. Jäger, T. Hausotte, R. Füßl: „Recent developments and challenges of nanopositioning and nanomeasuring technology“ in: *Measurement Science and Technology* **23**, (2012)
- [2] R. Köning, J. Flügge, H. Bosse: „A method for the *in situ* determination of Abbe errors and their correction“ in: *Measurement Science and Technology* **18**, 476-481 (2007)
- [3] I. Schmidt, T. Hausotte, U. Gerhardt, E. Manske, G. Jäger: „Investigations and calculations into decreasing the uncertainty of a nanopositioning and nanomeasuring machine (NPM-Machine)“ in: *Measurement Science and Technology* **18**, 482-486 (2007)
- [4] N. Eisenhauer: „Optimierung einer Methode zur optischen Winkelmessung mit einem Kösters-Prisma“, 2017, Masterarbeit, TU Ilmenau